

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-322298

(43)Date of publication of application : 03.12.1996

(51)Int.Cl.

H02P 9/00

F03D 7/04

G01P 3/44

H02M 7/72

H02P 1/52

H02P 21/00

(21)Application number : 07-125311

(71)Applicant : YAMAHA MOTOR CO LTD

(22)Date of filing : 24.05.1995

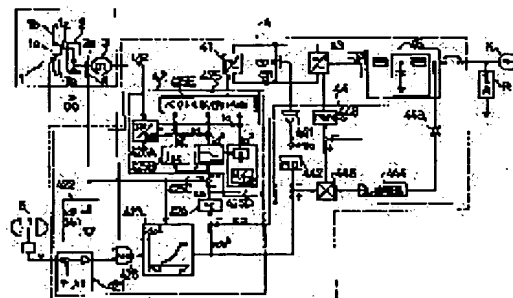
(72)Inventor : HIBINO YUKIO

**(54) WIND POWER GENERATING APPARATUS**

(57)Abstract:

**PURPOSE:** To start a windmill securely and improve the power generating efficiency in a low wind velocity range.

**CONSTITUTION:** A generator 3 which is driven by a windmill 1 is connected to a power system K through a generation controller 4 composed of a converter 41 and an inverter 43. If it is decided that, although a wind velocity is a generation enabling velocity, a rotor revolution N is No (rotor stopping revolution)  $\leq N \leq N_P$  (generation starting revolution) by a wind velocity discriminator 421 and a revolution discriminator 422, the output current of the converter 41 is controlled in accordance with the output current characteristics in an output regulator 423, the output current of the converter 41 which is detected by a current detector CT and the rotor revolution N and the power running of the generator 3 is started. When the rotor revolution N reaches the generation starting revolution  $N_P$ , the operation of the generator 3 is switched to the regenerative operation to start the generation. If the windmill 1 is not started even at the generation enabling wind velocity, the rotor 3a is forcibly turned by the power running to start the generation securely.

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

**BEST AVAILABLE COPY**



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-322298

(43)公開日 平成8年(1996)12月3日

(51)Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 2 P 9/00			H 0 2 P 9/00	F
F 0 3 D 7/04			F 0 3 D 7/04	E
G 0 1 P 3/44			G 0 1 P 3/44	X
H 0 2 M 7/72		9181-5H	H 0 2 M 7/72	
H 0 2 P 1/52			H 0 2 P 1/52	

審査請求 未請求 請求項の数4 O L (全 13 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願平7-125311

(22)出願日 平成7年(1995)5月24日

(71)出願人 000010076

ヤマハ発動機株式会社

静岡県磐田市新貝2500番地

(72)発明者 日比野 由貴夫

静岡県磐田市新貝2500番地 ヤマハ発動機  
株式会社内

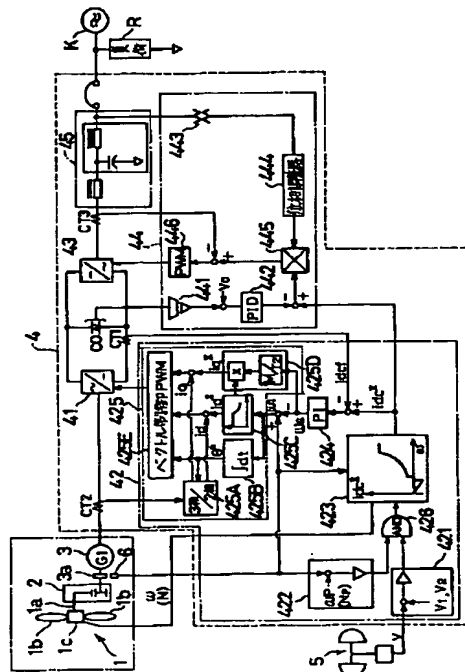
(74)代理人 弁理士 小谷 悦司 (外3名)

(54)【発明の名称】 風力発電装置

(57)【要約】

【目的】 風車の起動を確実に行わせ、低風速域における発電効率を向上する。

【構成】 風車1により駆動させる発電機3はコンバータ41及びインバータ43からなる発電制御装置4を介して電力系統Kに接続されている。風速判別器421及び回転数判別器422により風速が発電可能風速であるが、ロータ回転数Nがロータ停止回転数 $N_0 \leq N \leq$ 発電開始回転数 $N_p$ であると判別されると、出力調整回路423内の出力電流特性と電流検出器CT1で検出されたコンバータ41の出力電流及びロータ回転数Nとに基づきコンバータ41の出力電流を制御して発電機3の力行運転が開始され、ロータ回転数Nが発電開始回転数 $N_p$ に上昇すると、発電機3を回生運転に切り換えて発電を開始する。発電可能風速においても風車1が起動しないときは力行運転により強制的にロータ3aを回転させて確実に発電させるようにした。



**【特許請求の範囲】**

【請求項 1】 風車の回転力により駆動される交流発電機と、上記交流発電機から出力される交流電力を制御するとともに、この交流電力を直流電力に変換する第 1 の電力変換手段と、上記第 1 の電力変換部から出力される直流電力を所定周波数の交流電力に変換して電力系統に供給する第 2 の電力変換手段と、風速を検出する風速検出手段と、上記交流発電機のロータの回転数を検出する回転数検出手段と、風速が発電可能な風速であるか否かを判別する風速判別手段と、上記ロータの回転数が予め設定された継続回転可能な回転数以下に低下しているか否かを判別する回転数判別手段と、風速が発電可能な風速以上で、かつ、ロータの回転数が上記継続回転可能な回転数以下のときは、上記第 1 及び第 2 の電力変換手段を力行運転し、少なくとも予め設定された発電のための自己起動可能な回転数まで上記ロータの回転数を強制的に上昇させる運転制御手段とを備えたことを特徴とする風力発電装置。

【請求項 2】 請求項 1 記載の風力発電装置において、上記第 1 の電力変換手段の出力電流を検出する電流検出手段を備え、上記運転制御手段は、予め設定された出力電流特性と検出された出力電流及びロータの回転数とに基づき上記第 1 の電力変換手段の出力電流を制御して上記ロータを定トルク駆動するものであることを特徴とする風力発電装置。

【請求項 3】 請求項 1 記載の風力発電装置において、上記第 1 の電力変換手段の出力電力を検出する電力検出手段を備え、上記運転制御手段は、予め設定された出力電力特性と検出された出力電力及びロータの回転数とに基づき上記第 1 の電力変換手段の出力電力を制御して上記ロータを定出力駆動するものであることを特徴とする風力発電装置。

【請求項 4】 請求項 1 記載の風力発電装置において、上記運転制御手段は、予め設定された角加速度特性に基づき上記第 1 の電力変換手段の励磁周波数を制御して上記ロータを加速度駆動するものであることを特徴とする風力発電装置。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

【産業上の利用分野】 本発明は、風力エネルギーを電気エネルギーに変換する風力発電装置に係り、特に低風速時の発電効率を高める発電制御に関するものである。

**【0002】**

【従来の技術】 従来、特開昭 62-284969 号公報に示されるように、プロペラのピッチ角を調節することで、風速の変化に拘らずロータの回転数を一定に保持したり、出力を一定に保持する風速発電装置が知られている。

【0003】 図 9 はロータ回転数に対するロータ出力トルクを示す特性図であるが、同図に示すように、ロータ

出力トルクはピーク（最大トルク）を有し、プロペラのピッチ角  $\beta$  を大きくする程、最大トルク  $\tau_{MAX}$  を生じるロータ回転数  $N$  及びその最大トルク  $\tau_{MAX}$  が低下するから、上記ピッチ角制御可能な風力発電装置においては、一般に風車の起動時はプロペラのピッチ角  $\beta$  を運転時のピッチ角  $\beta$  より大きい起動ピッチ角  $\beta_S$  に設定して風車の起動特性を向上させるようにしている。

**【0004】**

【発明が解決しようとする課題】 従来のピッチ角制御可能な風力発電装置は、起動時はピッチ角  $\beta$  を大きくして可及的低風速  $V$  においても風車が起動可能になされているが、ピッチ角  $\beta$  を大きくすると、ロータ出力トルクの最大値  $\tau_{MAX}$  は低下するから、起動可能な風速  $V$  にも一定の限界がある（図 9 参照）。

【0005】 一方、風車を起動させる場合、ロータの軸受やロータに連結されている増速機の歯車等の摩擦抵抗は回転開始時に最も大きくなり、その最大抵抗値も一定しないから、予め設定された風速  $V$  以上で確実に風車を起動させることは困難である。

【0006】 また、上記ピッチ角  $\beta$  は油圧や電動モータ等によりプロペラの支持軸を回動して行われるが、起動ピッチ角により風車を起動させる方式は、風速  $V$  が起動可能な風速  $V_S$  を境に変化している場合、プロペラのピッチ角  $\beta$  が風速  $V$  の変化に応じて起動ピッチ角  $\beta_S$  と定格ピッチ角  $\beta_G$  とに頻繁に切り換えられ、耐久性の面で不利である。

【0007】 誘導発電機を開閉器を介して直接、電力系統に接続し、低風速域では誘導発電をモータとして強制起動させることも考えられるが、このようにすると、誘導発電機の起動電流は定格電流の 5～6 倍にもなるので、起動時に大電流が流れ、発電機側から上記ロータの軸受、増速機の歯車等に過大な起動トルクが伝達され、プロペラの耐久特性上、問題があるとともに、発電電力の安定供給という基本的な要求にも反することとなる。

【0008】 本発明は、上記課題に鑑みてなされたものであり、発電可能な風速で確実に発電機を起動させることのできる風力発電装置を提供することを目的とする。

**【0009】**

【課題を解決するための手段】 請求項 1 記載の発明は、風車の回転力により駆動される交流発電機と、上記交流発電機から出力される交流電力を制御するとともに、この交流電力を直流電力に変換する第 1 の電力変換手段と、上記第 1 の電力変換部から出力される直流電力を所定周波数の交流電力に変換して電力系統に供給する第 2 の電力変換手段と、風速を検出する風速検出手段と、上記交流発電機のロータの回転数を検出する回転数検出手段と、風速が発電可能な風速であるか否かを判別する風速判別手段と、上記ロータの回転数が予め設定された継続回転可能な回転数以下に低下しているか否かを判別する回転数判別手段と、風速が発電可能な風速以上で、か

つ、ロータの回転数が上記継続回転可能な回転数以下のときは、上記第 1 及び第 2 の電力変換手段を力行運転し、少なくとも予め設定された発電のための自己起動可能な回転数まで上記ロータの回転数を強制的に上昇させる運転制御手段とを備えたものである。

【0010】また、請求項 2 記載の発明は、上記風力発電装置において、上記第 1 の電力変換手段の出力電流を検出する電流検出手段を備え、上記運転制御手段は、予め設定された出力電流特性と検出された出力電流及びロータの回転数とに基づき上記第 1 の電力変換手段の出力電流を制御して上記ロータを定トルク駆動するものである。

【0011】また、請求項 3 記載の発明は、上記風力発電装置において、上記第 1 の電力変換手段の出力電力を検出する電力検出手段を備え、上記運転制御手段は、予め設定された出力電力特性と検出された出力電力及びロータの回転数とに基づき上記第 1 の電力変換手段の出力電力を制御して上記ロータを定出力駆動するものである。

【0012】また、請求項 4 記載の発明は、上記風力発電装置において、上記運転制御手段は、予め設定された角加速度特性に基づき上記第 1 の電力変換手段の励磁周波数を制御して上記ロータを角加速度駆動するものである。

【0013】

【作用】請求項 1 記載の発明によれば、風速が発電可能な風速以上であるが、ロータの回転数が継続回転可能な回転数  $N_0$  以下のときは、第 1 及び第 2 の電力変換手段を力行運転させて交流発電機がモータとして駆動され、少なくとも発電のための自己起動可能な回転数  $N_E$  ( $> N_0$ ) までロータの回転数が強制的に上昇される。そして、ロータが発電可能な回転数  $N_p$  ( $> N_E$ ) に上昇すると、第 1 及び第 2 の電力変換手段の運転が再生運転に切り換えられ、交流発電機で発生した電力が電力系統に出力される。

【0014】請求項 2 記載の発明によれば、交流発電機の力行運転においては、予め設定された出力電流特性に基づく目標電流値に現在の第 1 の電力変換手段の出力電流とロータの回転数の検出結果がフィードバックされて電流制御値が設定され、この電流制御値に基づき上記第 1 の出力電流が制御される。これによりロータは所定の定トルク特性で回転駆動されて継続回転可能な回転数  $N_E$  まで上昇される。

【0015】請求項 3 記載の発明によれば、交流発電機の力行運転においては、予め設定された出力電力特性に基づく目標電力値に現在の第 1 の電力変換手段の出力電力とロータの回転数の検出結果がフィードバックされて電力制御値が設定され、この電力制御値に基づき上記第 1 の出力電流が制御される。これによりロータは所定の定出力特性で回転駆動されて継続回転可能な回転数  $N_E$

まで上昇される。

【0016】請求項 4 記載の発明によれば、予め設定された角速度特性に基づき周波数制御値が設定され、この周波数制御値に基づき上記第 1 の電力変換手段の励磁周波数が制御される。これにより上記ロータは所定の角加速度特性で回転駆動されて継続回転可能な回転数  $N_E$  まで上昇される。

【0017】

【実施例】図 1 は、本発明に係る風力発電装置の第 1 実施例の構成図である。同図において、風車本体 1 は風力エネルギーを機械的動力に変換する回転機械部で、回転軸 1 a に対して垂直方向に突設された 2 枚乃至数枚のピッチ角  $\beta$  の変更可能なプロペラ 1 b とこのプロペラ 1 b のピッチ角  $\beta$  を変更するピッチ角変更装置 1 c とを備えている。増速機 2 は上記回転軸 1 a の回転速度を所定の比率で増大して発電機 3 のロータ 3 a に伝達するものである。

【0018】発電機 3 (図中、G 1 で示す。) は誘導機からなるエネルギー変換装置で、発電制御装置 4 を介して電力系統 K に接続されている。

【0019】発電制御装置 4 は発電機 3 の励磁周波数を制御するとともに、その出力電力を制御するコンバータ 4 1、このコンバータ 4 1 の駆動を制御するコンバータ制御回路 4 2、上記コンバータ 4 1 から出力される直流電力を商用周波数 (50 Hz 又は 60 Hz) の交流電力に再変換して電力系統 K に供給するインバータ 4 3、このインバータ 4 3 の駆動を制御するインバータ制御回路 4 4 及びこのインバータ制御回路 4 4 からの出力電圧波形を正弦波に波形成形するフィルタ回路 4 5 から構成されている。

【0020】上記コンバータ 4 1 は、例えばスイッチングトランジスタやサイリスタ等のスイッチング素子を用いた 3 相コンバータからなり、上記インバータ 4 3 は上記コンバータ 4 1 と同様の構成の 3 相インバータからなる。コンバータ 4 1 とインバータ 4 3 とは並列接続され、コンバータ 4 1 の出力端子間には直流出力を平滑するための平滑コンデンサ C 0 が並列接続されている。

【0021】上記コンバータ制御回路 4 2 は風速判別器 4 2 1、回転数判別器 4 2 2、出力調整回路 4 2 3、P I (Proportional Integral) 調節器 4 2 4 (図中、P I で示す。) 及び電流制御回路 4 2 5 から構成されている。

【0022】風速判別器 4 2 1 は風速  $V$  が発電可能な風速の範囲 ( $V_1 \leq V \leq V_2$ ) にあるか否かを判別するもので、風速検出器 5 により検出された風速  $V$  と予め設定された閾値  $V_1$ 、 $V_2$  とを比較し、風速  $V$  が上記風速範囲外であれば、ローレベルの判別信号を出力し、上記風速範囲内であれば、ハイレベルの判別信号を出力する。

【0023】回転数判別器 4 2 2 は発電機 3 のロータ 3 a の回転数  $N$  が発電可能な回転数  $N_p$  (以下、発電開始

回転数 $N_p$ という。)以上になっているか否かを判別するもので、角速度検出器6により検出された角速度 $\omega$ ( $N$ )と予め設定された発電開始角速度 $\omega_p$ ( $N_p$ )とを比較し、角速度 $\omega$ が発電開始角速度 $\omega_p$ より低速であれば、ローレベルの判別信号を出力し、発電開始角速度 $\omega_p$ 以上であれば、ハイレベルの判別信号を出力する。

【0024】上記風速判別器421及び回転数判別器422から出力される判別信号はAND回路426により論理積信号に変換され、この論理積信号が上記出力調整回路423に入力される。上記論理積信号は、風速 $V$ が発電可能風速範囲で、かつ、ロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_p$ 以上であるか否かの判別信号で、 $V_1 \leq V \leq V_2$ かつ $N \geq N_p$ であれば、ハイレベルの判別信号が出力調整回路423に入力され、風速 $V < V_1$ 又は $V_2 < V$ 、かつ、 $N < N_p$ であれば、ローレベルの判別信号が出力調整回路423に入力される。

【0025】出力調整回路423は発電機3の出力を調整するものである。出力調整回路423は、ロータ3aの角速度 $\omega$ に対する直流電流指令値 $i_{dc}^*$ の関数プログラムを有し、この関数プログラムにより角速度検出器6から入力されるロータ3aの現在角速度 $\omega$ 及び上記AND回路426から入力される判別信号に基づき直流電流指令値 $i_{dc}^*$ を出力する。

【0026】上記関数プログラムは、ロータ角速度 $\omega$ が力行運転開始角速度 $\omega_0$ (力行運転開始回転数 $N_0$ )になると、力行運転停止角速度 $\omega_E$ に上昇するまで発電機3をモータとして駆動し、更にロータ角速度 $\omega$ が発電開始角速度 $\omega_p$ に上昇すると、発電機3の回生運転を開始するようになっている。そして、ロータ角速度 $\omega$ が発電開始角速度 $\omega_p$ と定格出力 $P_1$ の発電が可能になる定格角

速度 $\omega_C$ 間ではすべり周波数制御により定周速比運転を行い、ロータ角速度 $\omega$ が上記定格角速度 $\omega_C$ 以上になると、風車本体1のプロペラ1bのピッチ角制御により定格出力運転を行うようになっている。

【0027】従って、出力調整回路423は、ピッチ角変更装置1cに、 $\omega < \omega_C$ においては、上記プロペラ1bのピッチ角を所定の定格ピッチ角 $\beta_C$ に固定する制御値を出力し、 $\omega_C \leq \omega$ においては、発電機3の出力を定格出力に保持すべくロータ角速度 $\omega$ が定格角速度 $\omega_C$ に維持されるようにロータ角速度 $\omega$ の変動に応じた所定のピッチ角の制御値を出力する。

【0028】また、出力調整回路423は、コンバータ41に、 $\omega_0 \leq \omega \leq \omega_E$ においては、発電機3を力行運転するための直流電流指令値 $i_{dc}^*$ を出力し、 $\omega_p \leq \omega \leq \omega_C$ においては、発電機3の定周速比運転を行うための直流電流指令値 $i_{dc}^*$ を出力し、 $\omega_0 \leq \omega$ においては、発電機3の定出力運転を行うための直流電流指令値 $i_{dc}^*$ を出力する。

【0029】上記定周速比制御は、出力係数 $C_p$ が各風速 $V$ に対する最大出力係数 $C_{pMAX}$ となるように風速 $V$ に応じてコンバータ41の励磁周波数(すなわち、誘導発電機3のすべり周波数)を制御するもので、以下の原理に基づく制御である。

【0030】すなわち、プロペラ型風車による出力 $P$ 及び周速比 $T_{SR}$ は下記(1)式及び(2)式で表され、両式から風速 $V$ を消去すると、下記(3)式に示す出力 $P$ と風車の回転数 $N$ との関係式が得られる。

【0031】

【数1】

$$P = (1/2) \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad \dots (1)$$

$$T_{SR} = \omega_f \cdot R / V = 2\pi \cdot N_f \cdot R / (60 \cdot V) \\ = \pi \cdot R \cdot N_f / (30 \cdot V) \quad \dots (2)$$

但し、 $C_p$ : 出力係数       $V$ : 風速       $R$ : プロペラ半径  
 $\rho$ : 空気密度       $\omega_f$ : 風車の角周波数  
 $N_f$ : 風車の回転数       $N$ : 風車の回転数 (rpm)

【0032】

【数2】

$$P \doteq (1.8 \times 10^{-3}) \cdot \rho \cdot R^5 \cdot C_p \cdot N_f^3 / T_{SR}^3 \\ = K \cdot C_p \cdot N_f^3 / T_{SR}^3 \quad \dots (3)$$

$$\text{但し、} K = (1.8 \times 10^{-3}) \cdot \rho \cdot R^5$$

【0033】プロペラのピッチ角 $\beta$ が一定であれば、出力係数 $C_p$ はある周速比 $T_{SR0}$ で最大となるから、風速 $V$ の変化に応じて周速比 $T_{SR0}$ となるように風車の回転数

$N$ を制御すれば、上記(3)式より出力 $P$ は常にその風速 $V$ における最大出力 $P_{MAX}$ ( $=K \cdot C_{pMAX} \cdot N_f^3 / T_{SR0}^3$ )とすることができる。

【0034】一方、あるピッチ角 $\beta$ においては、周速比 $T_{SR0}$ 及び最大出力係数 $C_{PMAX}$ はそれぞれ一定値となるから、上記 $P_{MAX} = K \cdot C_{PMAX} \cdot N_f^3 / T_{SR0}^3$ の関係式より風車の各回転数 $N$ に対する最大出力 $P_{MAX}$ は一義的に決定され、最大出力 $P_{MAX}$ は回転数 $N_f^3$ の関数として算出することができる。従って、風車の回転数 $N_f$ 、すなわち、ロータ3aの回転数 $N$ に対する出力 $P$ が常にその回転数 $N$ に対する最大出力 $P_{MAX}$ となるようにコンバータ41の励磁周波数を制御することにより等価的に定周速比制御を行うことができる。

【0035】本実施例では、ロータ3aの回転数 $N$ に対する最大出力 $P_{MAX}$ に対応するコンバータ41の出力電流 $i_{dc}^*$ の関数を予め設定しておき、発電機3のロータ3aの角速度 $\omega$ を検出するとともに現在の発電機の出力電流 $i_{dcf}$ を検出し、上記検出結果 $\omega$ に基づき上記関数から電流制御目標値 $i_{dc}^*$ を算出する。そして、算出された電流制御目標値 $i_{dc}^*$ と上記検出出力電流 $i_{dcf}$ との偏差が無くなるように発電機3の励磁周波数（同期速度）を調整してロータ3aの角速度 $\omega$ （回転数 $N$ ）を制御することにより上記定周速比制御を行うようにしている。

【0036】一方、上記定出力制御は、発電機3のロータ3aの回転数 $N$ が定格出力 $P_1$ を出力し得る定格回転数 $N_G$ に保持されるように、回転数 $N$ の変化に応じてピッチ角変更装置1cを介して風車本体1のプロペラ1bのピッチ角 $\beta$ を制御するものである。

【0037】PI調節器424は、フィードバック系の動作を安定させるための信号調節器で、電流検出器CT1により検出されたコンバータ41の出力電流 $i_{dcf}$ を上記直流電流指令値 $i_{dc}^*$ に負帰還させて得られる偏差信号 $\Delta i_{dc}^* (= i_{dc}^* - i_{dcf})$ をPI動作制御信号に調節するものである。

【0038】上記偏差信号 $\Delta i_{dc}^*$ はすべり角速度に相当する信号で、PI調節器424から出力されるPI動作制御信号（以下、すべり角速度信号 $\omega_s$ という）は電流制御回路425のトルク電流生成回路425Dに入力される一方、このすべり角速度信号 $\omega_s$ と角速度検出器6により検出されたロータ3aの角速度 $\omega$ とからコンバータ41の励磁周波数の制御目標値に相当する周波数制御信号 $\omega_1 (= \omega - \omega_s)$ が生成され、この周波数制御信号 $\omega_1$ は電流制御回路425の励磁電流生成回路425Cに入力される。

【0039】電流制御回路425はベクトル制御により発電機3の速度制御を行うもので、3相/2相変換器425A、ベクトル制御パラメータの位相指令値 $\theta^*$ を生成する位相生成器425B、同パラメータの磁化電流指令値 $i_d^*$ を生成する磁化電流生成器425C、同パラメータのトルク電流指令値 $i_q^*$ を生成するトルク電流生成器425D及びコンバータ41の各スイッチング素子に対するゲートパルス信号を生成するベクトル制御PW

M回路425Eからなる。

【0040】3相/2相変換器425Aは電流検出器CT2により検出された発電機3の3相（ $u, v, w$ ）中の、例えば $u$ 相及び $w$ 相の励磁電流（ $i_u, i_w$ ）を磁化電流 $i_d$ 及びトルク電流 $i_q$ に変換（回転座標変換）するものである。3相/2相変換器425Aは3相励磁電流（ $i_u, i_w$ ）から互いに直交する2相電流（ $i_\alpha = (i_u + 2i_w) / \sqrt{3}, i_\beta = i_u$ ）を算出し、更にこの2相電流（ $i_\alpha, i_\beta$ ）と位相生成器425Bで生成された位相指令値 $\theta^*$ とから磁化電流 $i_d (= -i_\alpha \cdot \sin \theta^* + i_\beta \cdot \cos \theta^*)$ とトルク電流 $i_q (= i_\alpha \cdot \cos \theta^* + i_\beta \cdot \sin \theta^*)$ とを算出する。

【0041】また、位相生成器425B及び磁化電流生成器425Cは、上記周波数制御信号 $\omega_1$ に基づきそれぞれ上記位相指令値 $\theta^*$ と上記磁化電流指令値 $i_d^*$ とを生成し、トルク電流生成器425Dは上記すべり角速度信号 $\omega_s$ に基づき上記トルク電流指令値 $i_q^*$ を生成する。

【0042】上記位相指令値 $\theta^*$ は3相/2相変換器425A及びベクトル制御PWM回路425Eに入力され、上記磁化電流指令値 $i_d^*$ 及びトルク電流指令値 $i_q^*$ はそれぞれ3相/2相変換器425Aで算出された磁化電流 $i_d$ 及びトルク電流指令値 $i_q$ により差分としての磁化電流の指令値 $\Delta i_d (= i_d^* - i_d)$ とトルク電流の指令値 $\Delta i_q (= i_q^* - i_q)$ とに変換されてベクトル制御PWM回路425Eに入力される。

【0043】ベクトル制御PWM回路425Eは上記制御信号 $\Delta i_d, \Delta i_q$ に基づき磁化軸方向の電圧指令値 $v_d^*$ 及びトルク軸方向の電圧指令値 $v_q^*$ を算出するとともに、この電圧指令値 $v_d^*, v_q^*$ 及び上記位相指令値 $\theta^*$ に基づき3相電圧指令値（ $V_u, V_v, V_w$ ）を算出し、更にこの3相電圧指令値（ $V_u, V_v, V_w$ ）に基づきPWM信号からなるゲートパルス信号を生成してコンバータ41に出力する。

【0044】そして、コンバータ41は上記ベクトル制御PWM回路425Eから入力されるゲートパルス信号に基づき励磁回路が駆動され、等価的にすべり周波数を制御して発電機3の出力電流 $i_{dcf}$ を目標電流値 $i_{dc}^*$ （最大出力に対応する電流値）に調整する。

【0045】上記インバータ制御回路44は出力電圧検出器441、PID（Proportional Integral Derivative）調節器442、系統電圧検出器443、位相調整器444、乗算器445及びPWM回路446（図中、PWMで示す。）からなり、インバータ43による発電機出力と電力系統Kとの連系を適正に制御するものである。

【0046】すなわち、コンバータ41は発電機3側の影響を受ける一方、インバータ43は電力系統K及び負荷Rの影響を受け、両者の電力変換特性は異なるため、コンバータ41の出力電流とインバータ43の出力電流

との誤差に起因してコンバータ 43 の出力電圧の上昇又は低下が発生することがあるが、インバータ制御回路 44 は上記出力電流の誤差を 0 にするようにインバータ 43 の駆動を制御し、これにより上記コンバータ 41 の出力電圧を所定電圧  $V_0$  に保持するようになっている。

【0047】また、インバータ制御回路 44 は電力系統 K の交流電力の位相情報に基づいてインバータ 43 の駆動を制御し、これにより発電機 3 の発生電力は電力系統 K と同期を取りつつ有効にこの電力系統 K に回生される。

【0048】インバータ制御回路 44 において、出力電圧検出器 441 により検出されたコンバータ 41 の出力電圧  $V$  は直流電圧指令値（上記所定電圧に相当） $V_0$  と比較され、その差分である偏差信号  $\Delta V$  ( $=V-V_0$ ) が PID 調節器 442 により PID 動作信号に調節される。PID 調節器 442 から出力される偏差信号  $\Delta V$  は出力調整回路 423 から出力される直流電流指令値  $i_{dc}^*$  に正帰還されてコンバータ 41 の出力電圧の変動分が補償された直流電流指令値  $i_{dc}^*$  が生成され、この直流電流指令値  $i_{dc}^*$  が乗算器 445 に入力される。

【0049】一方、系統電圧検出器 443 により電力系統 K の交流電圧が検出されるとともに、位相調整器 444 によりこの交流電圧の位相が検出され、この検出結果は上記乗算器 445 に入力される。

【0050】そして、乗算器 445 により上記直流電流指令値  $i_{dc}^*$  と位相情報とを乗じて電力系統 K に同期した電流瞬時指令値  $i^*$  が生成され、更にこの電流瞬時指令値  $i^*$  に電流検出器 CT3 で検出されたインバータ 43 の出力電流の瞬時値  $i_{ac}$  が負帰還されて差分としての制御信号  $\Delta i$  ( $=i^*-i_{ac}$ ) が生成され、この制御信号  $\Delta i$  が PWM 回路 446 に入力される。

【0051】PWM 回路 446 は制御信号  $\Delta i$  に基づき PWM 信号からなるゲートパルス信号を生成し、このゲートパルス信号によりインバータ 43 は上記制御信号  $\Delta i$  が 0 となるようにフィードバック制御される。

【0052】次に、図 2 のフローチャートを用いて上記風力発電装置の発電制御について説明する。

【0053】図 2 は、風速 0 (m/s) から定格運転可能な風速までの発電制御を示すフローチャートである。

【0054】運転待機モードにおいては（#2）、回転数判別回路 422 によりロータ 3a の回転数  $N$  が発電開始回転数  $N_p$  以上に上昇しているか否かが判別され（#4）、回転数  $N$  が発電開始回転数  $N_p$  以上に上昇すると（#4 で YES）、発電機 3 による発電が開始され（#6）、発電機 3 は、予め設定された関数プログラム（出力調整回路 423 内の関数プログラム）に従ってコンバータ制御回路 42 により定周速比運転が行われる（#8）。

【0055】この定周速比運転において、ロータ 3a の回転数  $N$  が発電機 3 の発電動作を停止すべき回転数  $N_s$

（ $<N_p$ 。以下、発電停止回転数  $N_s$  という。）より低い回転数に低下すると（#10 で NO）、発電動作を停止して #2 に戻り、ロータ 3a の回転数  $N$  が発電停止回転数  $N_s$  と定格回転数  $N_G$  間にあれば（#10 で YES、#12 で NO）、定周速比運転が継続される（#8 ~ #12 のループ）。

【0056】一方、ロータ 3a の回転数  $N$  が定格回転数  $N_G$  に上昇すると（#12 で YES）、発電機 3 の運転が定周速比運転から定出力運転に切り換えられる（#14）。この定出力運転において、回転数  $N$  が定格回転数  $N_G$  以上であれば（#16 で YES）、発電機 3 の定出力運転が継続され（#14、#16 のループ）、回転数  $N$  が定格回転数  $N_G$  より低い回転数に低下すると（#16 で NO）、#8 に戻り、発電機 3 の運転が定出力運転から定周速比運転に切り換えられる。

【0057】一方、#4 で回転数  $N$  が発電開始回転数  $N_p$  より低い回転数であれば（#4 で NO）、更にロータ 3a の回転数  $N$  がこのロータ 3a の回転停止を判定する回転数  $N_0$  （ $<N_s < N_p$ 。以下、ロータ停止回転数  $N_0$  という。）以下に低下しているか否かが判別される（#18）。

【0058】ロータ 3a の回転数  $N$  がロータ停止回転数  $N_0$  より低い回転数であれば（#18 で NO）、#2 に戻り、運転待機状態となり、回転数  $N$  がロータ停止回転数  $N_0$  以上であれば（#18 で YES）、更に風速検出器 5 により検出された風速  $V$  が発電可能な風速（ $V_1 \leq V \leq V_2$ ）であるか否かが判別される（#20）。

【0059】風速  $V$  が発電可能な風速でなければ（ $V < V_1$  又は  $V_2 < V$ 、#20 で NO）、#2 に戻り、運転待機状態となり、発電可能な風速であれば（ $V_1 \leq V \leq V_2$ 、#20 で YES）、発電機 3 の力行運転が開始され、ロータ 3a が強制的に回転される（#22）。

【0060】発電機 3 の力行運転は、ロータ 3a の回転数  $N$  が力行運転を停止させる回転数  $N_E$  （ $N_0 < N_E < N_s$ 。以下、力行運転停止回転数  $N_E$  という。）に上昇するまで継続され（#22、#24 のループ）、ロータ 3a の回転数  $N$  が力行運転停止回転数  $N_E$  に上昇すると（#24 で YES）、発電機 3 の力行運転が停止される（#26）。

【0061】なお、上記力行運転停止回転数  $N_E$  は、ロータ 3a の力行運転を停止させても慣性により上記発電開始回転数  $N_p$  まで回転上昇を継続し得る回転数で、発電のために自己起動可能な回転数である。力行運転停止回転数  $N_E$  は風車本体 1 及び発電機 3 の構成に基づき予め設定されている。

【0062】このフローチャートにおいては、発電開始回転数  $N_p$  より低い継続回転可能な回転数  $N_E$  で発電機 3 の力行運転を停止するようにしているが、図 3 のフローチャートに示すように、図 2 のフローチャートの #24 及び #26 のステップを削除し、ロータ 3a の回転数  $N$



が発電開始回転数 $N_p$ に上昇するまで発電機3の力行運転を継続するようにしてもよい（図3、#28のループ参照）。

【0063】このようにすれば、発電機3の力行運転開始直後に風速 $V$ の低下によりロータ3aの回転数 $N$ が低下し、回生運転を行うことなく再度力行運転のための強制起動が繰り返し行われるという不安定な運転動作を防止することができる。

【0064】図2の戻り、力行運転の停止後、ロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_p$ に上昇すると（#30でYES）、#6に移行し、発電機3の回生運転が開始され、ロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_p$ に上昇しなければ（#30でNO）、#2に戻り、待機状態となる。

【0065】図4は、上記風力発電装置の力行運転時におけるロータ回転数に対するロータの出力特性図である。

【0066】同図において、縦軸はロータ3aの出力であり、横軸はロータ3aの回転数 $N$ である。また、実線で示す出力特性は図2に示すフローチャートに対応するものであり、点線で示す出力特性は図3に示すフローチャートに対応するものである。また、矢印はロータ回転数 $N$ の変化方向を示すもので、風速上昇による発電開始時の経路（回転数 $N_p$ で発電開始）と風速下降による発電停止時の経路（回転数 $N_s$ で発電停止）とが異なるのは風車発電装置のヒステリシス特性によるものである。

【0067】実線で示す出力特性において、風速0（m/s）から風速 $V$ が上昇する場合、風速 $V$ の上昇に応じて発電機3のロータ3aの回転数 $N$ がロータ停止回転数 $N_0$ に上昇すると、発電機3の力行運転が開始され、この力行運転はロータ3aの回転数 $N$ が力行運転停止回転数 $N_E$ に上昇するまで継続される。

【0068】上記力行運転においては、コンバータ制御回路42により磁化電流 $i_d$ が調節されて発電機3の励磁回路の磁束が一定に保持されるとともに、トルク電流 $i_q$ が調節されてロータ3aの発生トルクが一定に保持され、定トルク制御（一定すべり制御）が行われる。従って、回転数 $N_0$ ～回転数 $N_E$ 間のロータ出力 $P$ は負領域においてロータ回転数 $N$ に比例して減少する。

【0069】そして、上記力行運転によりロータ3aの回転数 $N$ が力行運転停止回転数 $N_E$ に上昇すると、発電機3の力行運転が停止され、ロータ出力 $P$ は0になる。この後、ロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_p$ に上昇すると、発電機3の定周速比運転による発電が開始され、回転数 $N$ の上昇に応じて発電機3の出力は上昇する。

【0070】一方、発電可能な風域から風速 $V$ が低下する場合、ロータ3aの回転数 $N$ が発電停止回転数 $N_s$ にまで低下すると、発電機3の発電動作が停止され、ロータ出力 $P$ は0となる。そして、ロータ3aの回転数 $N$ が

ロータ停止回転数 $N_0$ にまで低下すると、ロータ3aの回転が停止したと判断して、再び発電機3の力行運転が開始される。

【0071】なお、力行運転の開始後、ロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_p$ に上昇するまで力行運転が継続する場合は、点線で示すようにロータ出力 $P$ は負領域において回転数 $N$ に比例して減少し、ロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_p$ に上昇すると、発電機3の運転が力行運転から回生運転に切り換えられる。なお、力行運転を発電開始回転数 $N_p$ まで継続する制御においては、同図の一点鎖線で示すように、発電開始回転数 $N_p$ の手前の回転数からトルクを徐々に低下させるようにしてもよい。

【0072】上記のように、ロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_p$ 以下の領域においては、発電機3を力行運転し、ロータ3aを強制的に回転駆動させるようにしているので、ロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_p$ に上昇した時点で確実に発電機3を回生運転させ、電力系統 $K$ に電力を供給することができる。

【0073】図5は、本発明に係る風力発電装置の第2実施例の構成図である。第1実施例は、コンバータ41の出力電流を制御することにより予め設定されたトルク特性で発電機3の力行運転を行うものであるが、第2実施例はコンバータ41の出力電力を制御することにより予め設定された出力特性で発電機3の力行運転を行うものである。

【0074】従って、図5は、図1において、出力調整回路423の関数プログラムをロータ3aの角速度 $\omega$ に対する直流電力指令値（目標値） $p_{dc}^*$ の関数プログラムに変更するとともに、電流検出器CT1により検出されたコンバータ41の出力電流 $i_{dcf}$ を出力電力 $p_{dcf}$ に変換し、上記出力調整回路423から出力される直流電力指令値 $p_{dc}^*$ に負帰還するための変換回路427を設け、更に電流制御回路425に代えてPWM回路428及び $V/F$ 変換回路429からなる電圧制御回路を設けたものである。

【0075】図5に示す風力発電装置においては、出力調整回路423から出力される直流電力指令値 $p_{dc}^*$ にコンバータ41の出力電力 $p_{dcf}$ が負帰還されて出力偏差信号 $\Delta p_{dc}^* (= p_{dc}^* - p_{dcf})$ が得られ、この偏差信号 $\Delta p_{dc}^*$ （すべり角速度信号 $\omega_s$ に相当）がPI調節器424にてPI動作制御信号に調節される。

【0076】そして、上記PI調節器424から出力されるPI動作制御信号と角速度検出器6により検出されたロータ3aの角速度 $\omega$ とから周波数制御信号 $\omega_1 (= \omega - \omega_s)$ が生成され、この周波数制御信号 $\omega_1$ はPWM回路428に入力されるとともに、 $F/V$ 変換回路429により電圧制御信号 $V_1^* (= K_v \cdot \omega_1)$ に変換されてPWM回路428に入力される。

【0077】上記周波数制御信号 $\omega_1$ 及び電圧制御信号

$V1^*$ はそれぞれ発電機3の一次周波数と一次電圧を制御する信号で、PWM回路428は周波数制御信号 $\omega 1$ 及び電圧制御信号 $V1^*$ に基づきPWM信号からなるゲートパルス信号を生成し、このゲートパルス信号をコンバータ41に出力して所定の定出力特性で発電機3を力行運転する。

【0078】第2実施例に係る風力発電装置も図2及び図3に示すフローチャートに従って発電制御が行われる。従って、ここでは発電制御の詳細説明は省略する。

【0079】図6は、第2実施例に係る風力発電装置の力行運転時におけるロータ回転数に対するロータの出力特性図である。

【0080】第1実施例に係る風力発電装置は、コンバータ41の出力電流を制御して定トルク特性で発電機3を力行運転していたので、回転数 $N_0$ ～回転数 $N_E$ 間のロータ出力 $P$ は負領域においてロータ回転数 $N$ に比例して減少していたが(図4参照)、第2実施例に係る風力発電装置は、コンバータ41の出力電力を制御して定出力特性で発電機3を力行運転するようにしているので、図6に示すように、回転数 $N_0$ ～回転数 $N_E$ 間のロータ出力 $P$ は、負領域においてロータ回転数 $N$ に関係なく一定値となっている。

【0081】なお、同図の点線で示す出力特性はロータ3aの回転数 $N$ が発電開始回転数 $N_{pl}$ に上昇するまで力行運転を継続する場合のものであり、一点鎖線で示す出力特性は、発電開始回転数 $N_{pl}$ の手前の回転数から出力を徐々に低下させるようにしたものである。

【0082】第1実施例と第2実施例とを比較した場合、第1実施例ではロータ回転数 $N$ に拘らず一定トルクで発電機3を力行運転するので、第2実施例に比して短時間でロータ3aの回転数 $N$ を発電開始回転数 $N_{pl}$ に上昇させることができる。一方、第2実施例は第1実施例に比して起動トルクが大きく、力行運転の起動が容易となる。

【0083】図7は、本発明に係る風力発電装置の第3実施例の構成図である。図7は、図5において、 $F/V$ 変換器429に代えて力行運転制御回路430を設けたもので、予め設定された角加速度特性に基づきコンバータ41の励磁周波数を制御することにより発電機3の力行運転を行うようにしたものである。

【0084】なお、発電機3の力行運転時には、 $PI$ 調節器424及び変換回路427等からなる周波数制御信号 $\omega 1$ の生成回路は動作させず、力行運転制御回路430及びPWM回路428のみでコンバータ41の運転制御が行われ、発電機3の運転が力行運転から回生運転に切り換えられると、上記生成回路を動作させて定周速比運転が行われる。

【0085】力行運転制御回路430は、図8に実線で示す角加速度特性( $\omega = K \cdot t$ )の関数プログラムを有し、力行運転が開始されると、上記関数プログラムに基

づき周波数制御信号 $\omega 1^* (= K \cdot t)$ と電圧制御信号 $V1^* (= K_v \cdot \omega 1^*)$ とを生成し、PWM回路428に入力する。

【0086】PWM回路428は上記周波数制御信号 $\omega 1^*$ 及び電圧制御信号 $V1^*$ に基づきPWM信号からなるゲートパルス信号を生成し、このゲートパルス信号をコンバータ41に出力して発電機3の力行運転を行う。

【0087】なお、上記角加速度特性は、加速度を一定としても良いが、図8の点線で示すように加速度を漸増させるようにしても良い。

【0088】上記のように、発電機3の力行運転においては、角加速度特性でロータ3aの回転駆動を行うようにしているので、より速やかにロータ3aの回転数 $N$ を発電開始回転数 $N_{pl}$ に上昇させることができる。

【0089】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、風速及び上記交流発電機のロータの回転数を検出し、風速が発電可能な風速以上で、かつ、ロータの回転数が予め設定された継続回転可能な回転数以下のときは、上記第1及び第2の電力変換手段を力行運転し、上記ロータの回転数を少なくとも発電のための自己起動可能な回転数まで上昇するようにしたので、発電可能な低風速において確実に交流発電機を起動させ、回生運転を行うことができる。

【0090】また、交流発電機の回生運転開示時にはロータが回転しているので、動力伝達系の摩擦抵抗が比較的小さく、起動時の可動部分への負荷が低減され、耐久特性における発電装置の負担が低減される。

【0091】また、上記交流発電機の力行運転において、第1の電力変換手段の出力電流を制御して上記ロータを定トルク駆動するようにしたので、比較的速やかにロータの回転数を発電可能回転数まで上昇させることができる。

【0092】また、上記交流発電機の力行運転において、第1の電力変換手段の出力電力を制御して上記ロータを定出力駆動するようにしたので、力行運転の起動を容易に行うことができる。

【0093】また、上記交流発電機の力行運転において、予め設定された角加速度特性に基づき第1の電力変換手段の励磁周波数を制御して上記ロータを加速度駆動するようにしたので、より迅速にロータの回転数を発電可能回転数まで上昇させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る風力発電装置の第1実施例の構成図である。

【図2】本発明に係る風力発電装置の風速0 (m/s) から定格運転可能な風速までの発電制御を示すフローチャートである。

【図3】本発明に係る風力発電装置の風速0 (m/s) から定格運転可能な風速までの発電制御の変形例を示すフ

ローチャートである。

【図 4】第 1 実施例に係る風力発電装置の力行運転時におけるロータ回転数に対するロータの出力特性図である。

【図 5】本発明に係る風力発電装置の第 2 実施例の構成図である。

【図 6】第 2 実施例に係る風力発電装置の力行運転時におけるロータ回転数に対するロータの出力特性図である。

【図 7】本発明に係る風力発電装置の第 3 実施例の構成図である。

【図 8】ロータ回転数の加速度特性を示す図である。

【図 9】ロータ回転数に対するロータ出力トルクを示す特性図である

【符号の説明】

1 風車本体

2 増速機

3 発電機（交流発電機）

4 発電制御装置

4 1 コンバータ（第 1 の電力変換手段）

4 2 コンバータ制御回路（運転制御手段）

4 2 1 風速判別器（風速判別手段）

4 2 2 回転数判別器（回転数判別手段）

4 2 3 出力調整回路

4 2 4 P I 調節器

4 2 5 電流制御回路

4 2 6 A N D 回路

4 2 7 変換回路（電力検出手段）

4 2 8 P W M 回路

4 2 9 F/V 変換回路

4 3 0 力行運転制御回路（運転制御手段）

4 3 インバータ（第 2 の電力変換手段）

4 4 インバータ制御回路

4 4 1 出力電圧検出器

4 4 2 P I D 調節器

4 4 3 系統電圧検出器

4 4 4 位相調整器

4 4 5 乗算器

4 4 6 P W M 回路

4 5 フィルタ回路

5 風速検出器（風速検出手段）

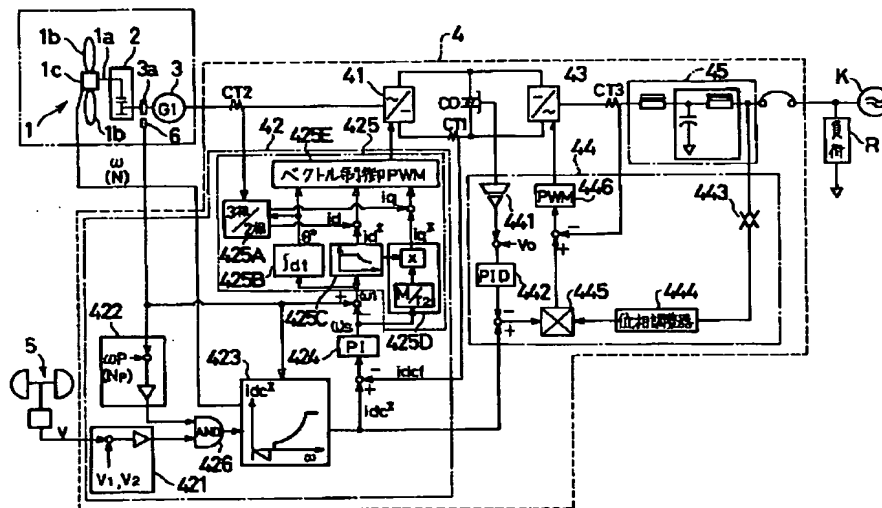
6 角速度検出器（回転数検出手段）

C T 1 電流検出器（電流検出手段）

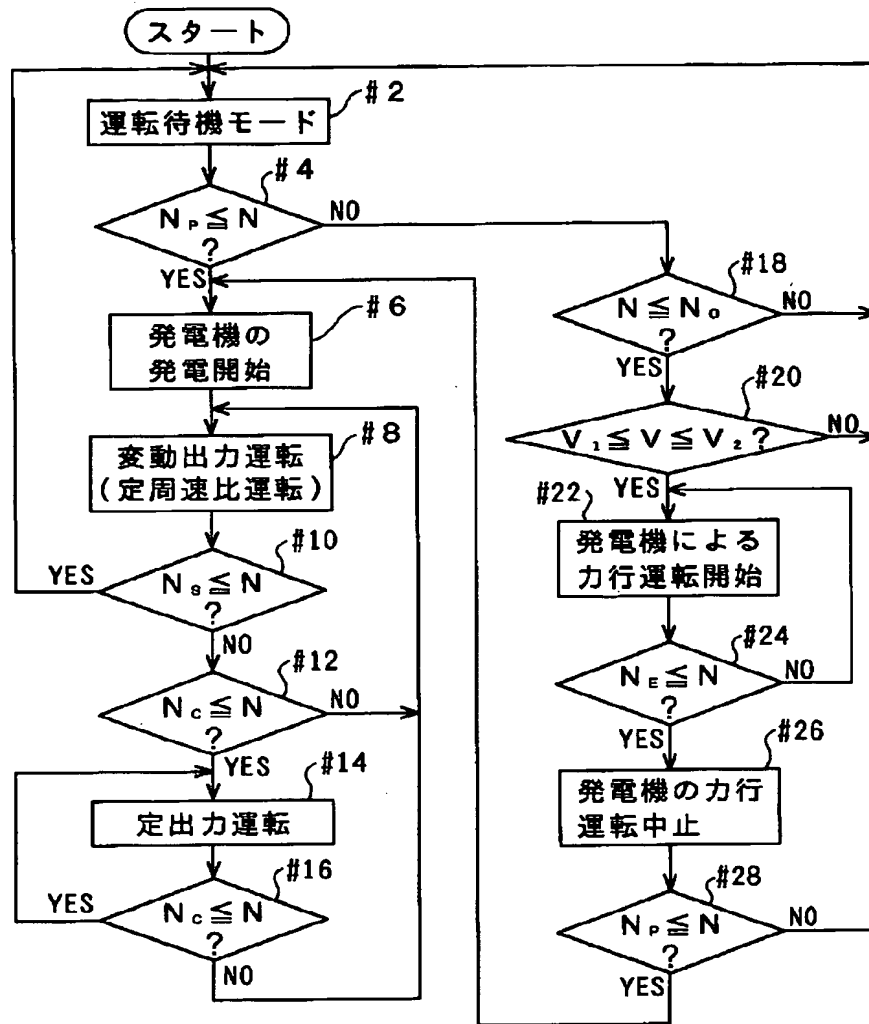
C T 2, C T 3 電流検出器

K 電力系統

【図 1】

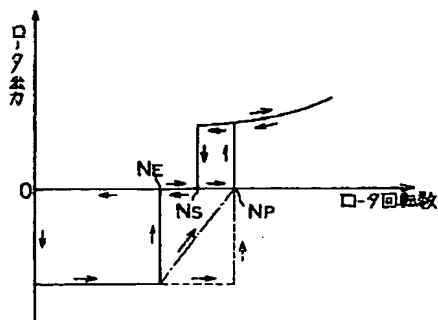


【図2】

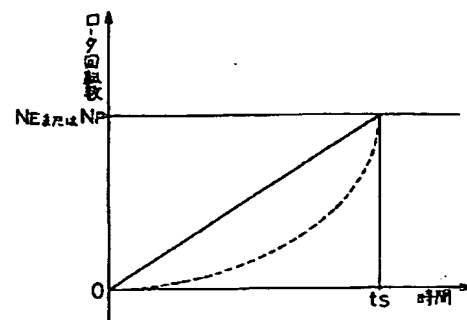


$$0 < N_o < N_s < N_e < N_p < N_c$$

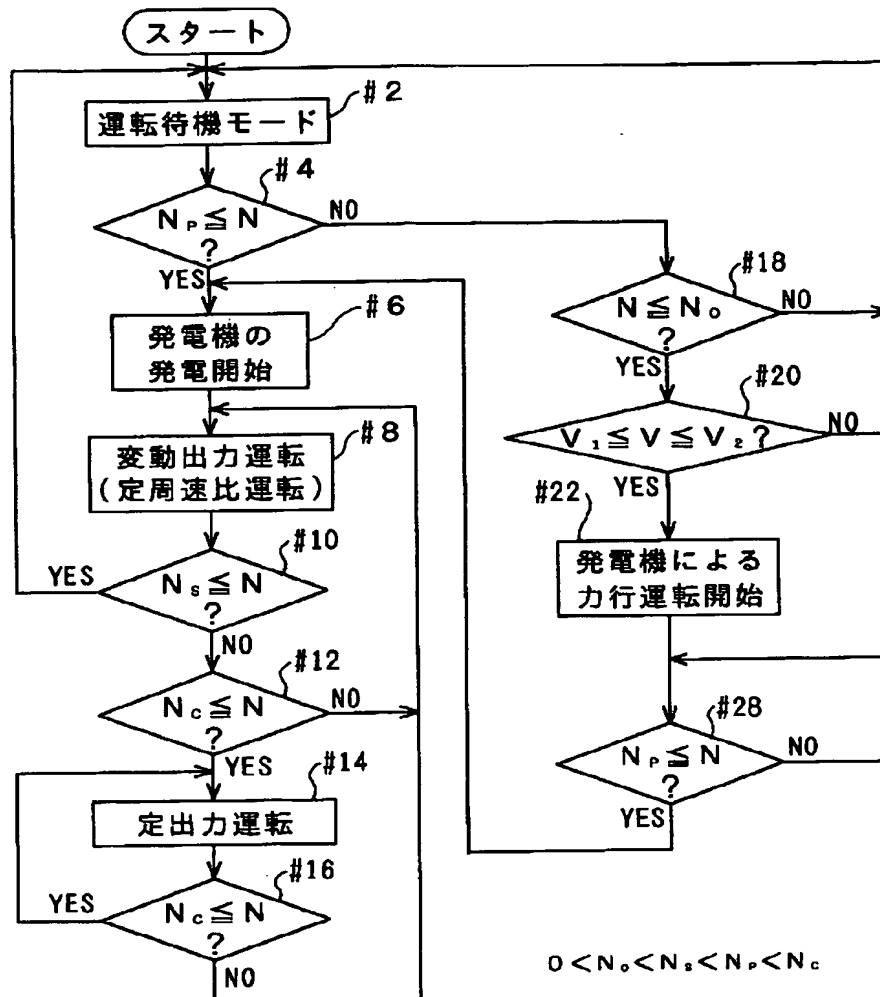
【図6】



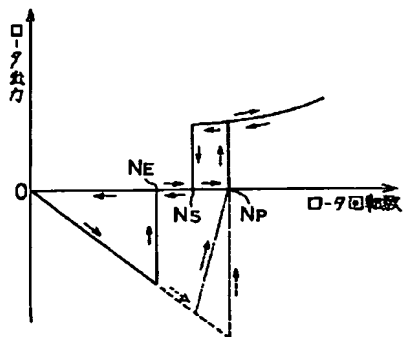
【図8】



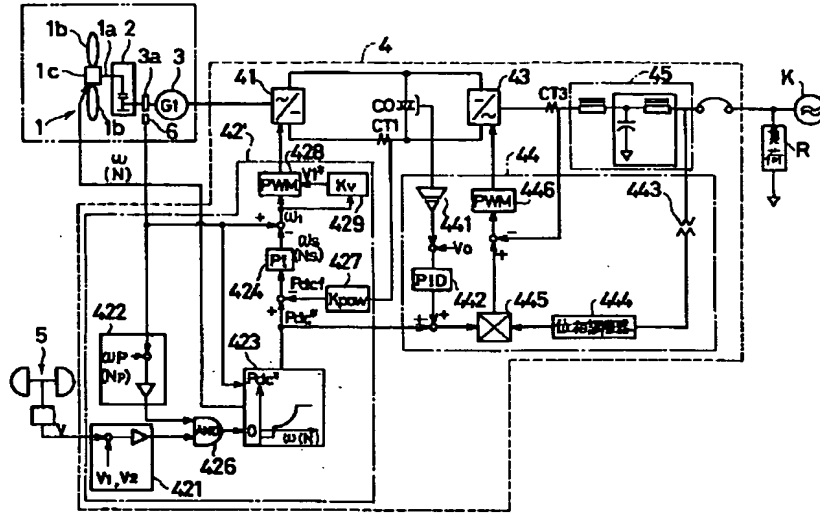
【図3】



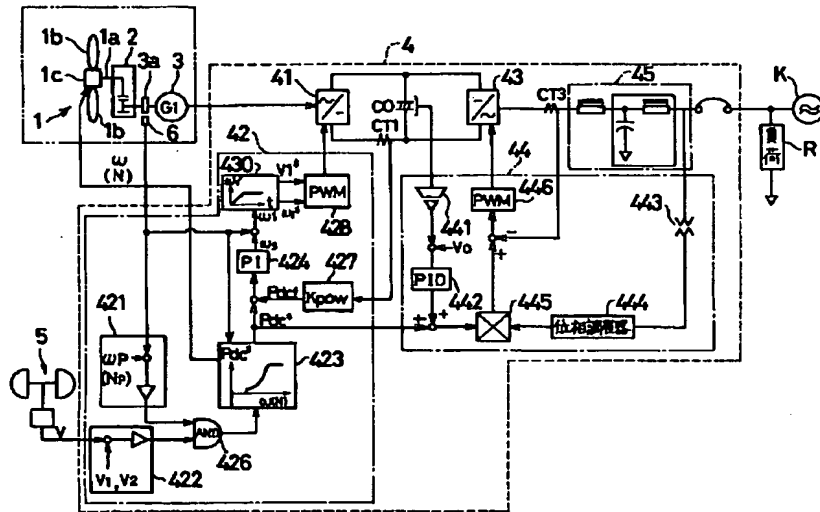
【図4】



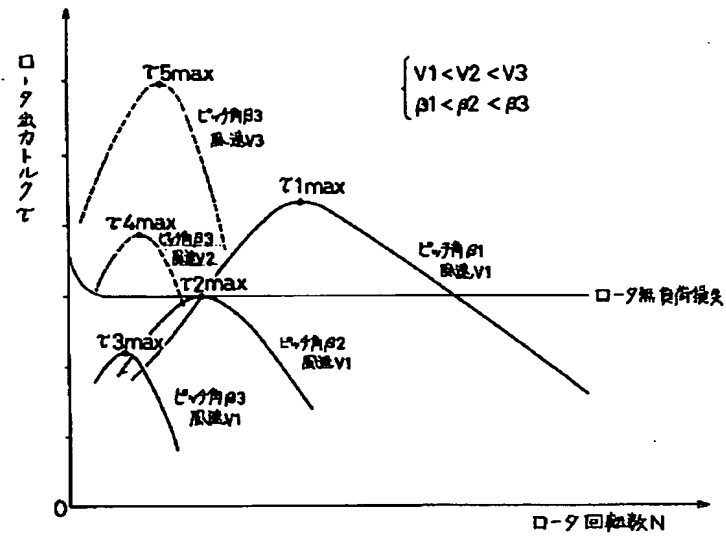
【図 5】



【図 7】



【図 9】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. 6

H 0 2 P 21/00

識別記号

庁内整理番号

F I

H 0 2 P 5/408

技術表示箇所

C